

# 点滴装置への応用を目的とした磁気マイクロポンプの小型化と高出力化に関する研究

浅井良太<sup>1</sup>, 山田外史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>金沢大学大学院電子情報工学専攻,

<sup>2</sup>環日本海域環境研究センター生体機能計測研究部門

R. Asai and S. Yamada

Developing miniaturized high power magnetic micro pumps in the saline drip device

## 1. はじめに

近年,  $\mu$  TAS (micro Total Analysis System) や自動投薬システム, 体内埋め込み式ポンプなど, 微量の液体を送液するマイクロポンプの研究が行われている. 静電方式, 圧電方式, 電磁方式, 形状記憶合金方式などを用いて容積式のマイクロポンプを構成している研究は多く見られるが, これらの多くはポンプ室や弁などが必要で, システムが複雑になり小型のポンプの作製が難しくなる, 流れが脈動するなどの課題がある. これらを解決する方法として磁気アクチュエータを外部磁界によって駆動させ, ポンプとして活用する方法が提案されている.

本研究で作製したスクリュウ形磁気マイクロポンプは, 磁気力を用いて螺旋形のインペラに動力を伝える. 回転させられたインペラ (羽根車) が, 液体に力を加えることで流れを生み出す. 磁気マイクロポンプの特徴としては, 構造がシンプルである. 脈動なしの送液ができる. 動力に磁気的な力を用いているため, ワイヤレスで動作可能である. インペラに動力用・支持用のシャフトが必要ない分, 摩擦を軽減できる. ポンプ室や弁を必要としない, などが挙げられる. 以上のことから磁気マイクロポンプは故障しにくくメンテナンスが容易であると言え, そうした特長から, 身につけて使う自動点滴装置への応用ができると考えられる.

点滴装置としてマイクロポンプを用いる場合, 装置が身につけられるサイズであること, 静脈圧 (約 980 Pa) よりも高い圧力で液送できること, 装置が傾いた場合も安定した流量を保てること, などが求められる. 今回は装置構成の見直しや改善に取り組み, 装置の小型化と高出力化をおこなった.

## 2. 磁気マイクロポンプの構成と動作原理

### 2.1 装置構成

磁気マイクロポンプは, 図 1 のように構成される. インペラが回転磁界と同期し回転することで, 管内の液体に力が加わり流れが発生する. インペラは回転することで軸方向に推進力を得て移動しようとするが, 永久磁石と回転磁界との間に軸方向の吸引力が働くことによって, インペラは定位置で保持されている.

### 2.2 インペラに作用するトルクと保持する力

磁気マイクロポンプは, 回転磁界と永久磁石の間に作用する磁気力によってトルクを生じ, インペラが回転する. その様子を図 2 に示す. 回転磁界を点電荷の回転とみると, 永久磁石は点電荷から  $F_y$  の力を受ける. 回転磁界と永久磁石のすべり角を  $\theta_1$  とした場合,  $F_y$  の作用する角度  $\theta_2$  は (1) 式であらわされる. この  $\theta_2$  を用いて, 永久磁石と電荷間に作用するトルクは (2) 式で表すことができる. 各極に  $T_m$  が作用するため永久磁石に回転磁界から作用するトルクは  $2T_m$  であらわされる.

$$\theta_2 = \pi - \theta_1 \left( 1 + \frac{1}{(1 + h/r) \cos \theta_1 - 1} \right) \quad (1)$$

$$T_m = F_y r \cos \theta_2 \quad (2)$$

軸方向に関しては、回転磁界と永久磁石との間に図3に示すような磁氣的引力が作用している。トルクと同様に回転磁界を点電荷の回転と考え、図のような配置で $\alpha \phi \times \beta$ の永久磁石を置いたとしたら、磁氣的引力 $F_g$ は(3)式であらわされる。

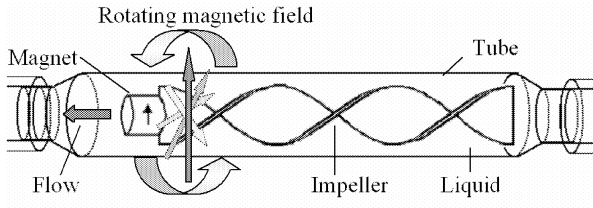


図1 磁気マイクロポンプの基本構成

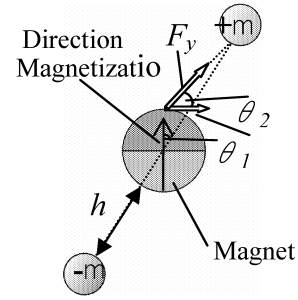


図2 磁石に作用するトルク

$$F_g = \int_{x-\frac{\beta}{2}}^{x+\frac{\beta}{2}} \frac{\alpha B m}{4 \pi \mu_0 (x^2 + y^2)} dx \quad (3)$$

$$F_x = -F_g \cos \theta_1 \quad (4)$$

$$F_y = F_g \sin \theta_1 \quad (5)$$

この $F_g$ の $x$ 成分 $F_x$ が軸方向でインペラを引き止める力となり、インペラの螺旋部の回転による推進力と釣り合うことでインペラの回転位置が固定されている。 $F_g$ の $y$ 成分 $F_y$ は静止状態では相殺され、回転状態ではインペラを回転させるトルクとして作用する。

磁界からの力だけではインペラに安定した回転をさせるのは困難であるため、本研究ではインペラの幅と回転させる管の内径の差をできるだけ小さくし、インペラの回転が安定するように配慮した。

### 2.3 インペラに作用する力

インペラには磁界から作用する回転トルクと保持する力のほかに、液送する液体からの力も受けている。インペラは回転トルクにより回転させられ推進力を発生する。しかし磁氣的引力が働きインペラは一定位置に保持される。磁界に引き止められながらインペラは回転しているので、図4のように推進力の反作用として液体が押し流される。

### 2.4 インペラの作成方法

厚さ 0.25 mm、幅 2.0 mm のスチレン製の板をひねることで、図5に示すような螺旋形を作っている。螺旋ピッチは、1.5/cm とし、全長 30, 60, 90 mm のものを製作した。螺旋部分の一端に $\phi 1 \times 3$  mm、着磁方向が径方向の円柱形 NdFeB 磁石を接着し、スクリュー形磁気マイクロポンプのインペラ部分を構成している。

### 2.5 回転磁界発生方法

図6に示すように、永久磁石を取り付けた円筒と、中空の回転子を製作し、中心軸を揃えて配置し回転磁界発生装置を構成する。回転子付近に永久磁石を固定子として配置し直流モータとして動作するようにした。

中空にした装置の回転軸に流路となる管を通し、管の中にインペラを置く。インペラの永久磁石を磁界発生装置の永久磁石と同期させれば、モータの回転にあわせてインペラを回転させることができる。図7に示すようにインペラの回転周波数は装置に印加する電圧値で調節することができる。装置が回転軸上につくる磁界の分布を図8に示す。

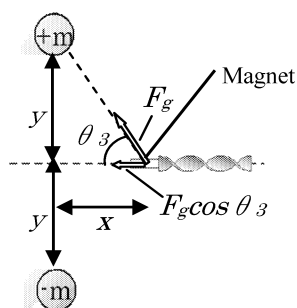


図3 軸方向の保持する力

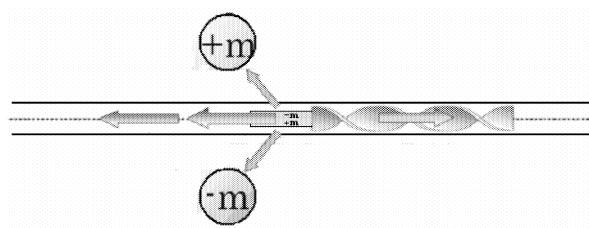


図4 インペラに作用する力

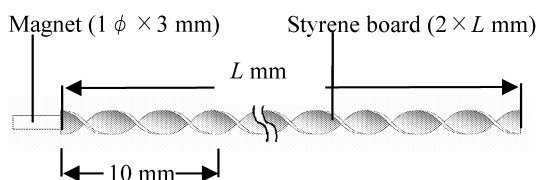


図5 インペラの構成

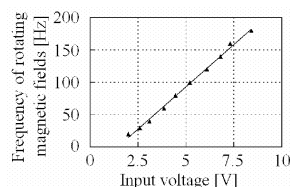


図7 印加電圧-回転周波数特性

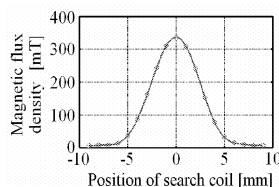


図8 駆動軸上の磁界分布

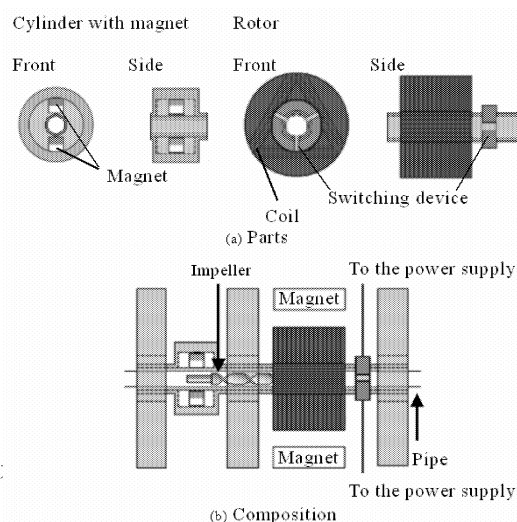


図6 回転磁界発生装置

### 3. 磁気マイクロポンプの流量・吐出圧特性

#### 3.1 ポンプの流量・吐出圧測定方法

図9にポンプの流量を測定するために使用した装置の概略図を示す。ポンプ動作時に吐出口より流れ出た液体は受け皿に溜め、吐出した液体の質量  $M$  [kg]、液体を吐出していた時間  $t$  [s]を測定し以下の式よりポンプの流量  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]を得る。液体の密度を  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]とすると

$$Q = \frac{M}{\rho \cdot t} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (6)$$

となる。

次に、吐出圧-流量特性の測定方法について説明する。ここでの吐出圧とは、図9のように吐出液面と吸込液面との垂直高さに差をつけることで発生する、吐出口から吸込口へと向かう圧力のことを指す。このとき発生する液面差による圧力  $P$  [Pa]は以下のように表される。重力加速度を  $g$  [m/s<sup>2</sup>]とすると、

$$P = \rho gh \quad [\text{Pa}] \quad (7)$$

となる。ポンプに圧力  $P$  をかけた状態でポンプ動作させ、流量  $Q$  を測定することで、磁気マイクロポンプの圧力-流量特性を得る。

#### 3.2 異なるインペラ長での流量特性の比較

ピッチ 1.5 /cm, 幅 2 mm, 長さ 30, 60, 90 mm のインペラの回転周波数 - 流量特性を測定した。流路長を 243mm として、回転周波数 0Hz から 180Hz まで 20Hz ごとの流量を測定した。その結果を図10に示す。回転周波数が大きくなるほど流量も大きくなることが確認できた。また回転周波数と流量には比例関係がみられた。実験で測定できた最大流量は長さ 90mm のインペラを 180Hz で回転させたときの 480  $\mu$  l/s である。

測定結果を各回転周波数の値で除算して求めたインペラ 1 回転あたりの流量を図11に示す。回転数

周波数が大きくなるほどインペラ 1 回転あたりの流量も大きくなっていき、それぞれのインペラ長で特定の値に収束していく様子が見られた。

特に長さ 60 mm のインペラでは回転周波数 160 Hz 以上にて  $2.2 \mu\ell$  に落ち着いているようにみえる。長さ 30 mm のインペラでは回転周波数 180 Hz において値が減少した。高回転になりすぎたためインペラが安定した回転をできていないのではないかと考えられる。

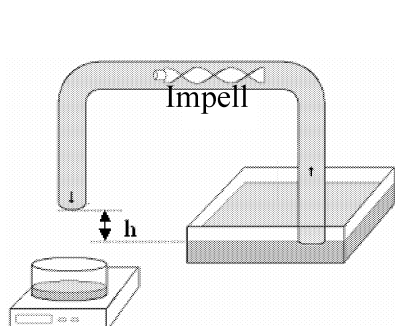


図 9 測定装置概略図

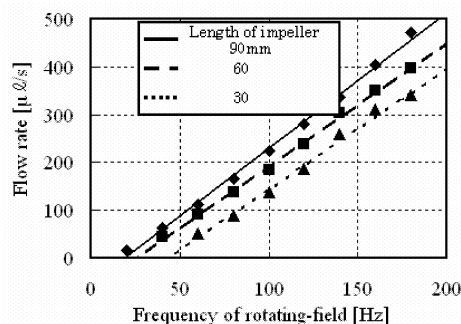


図 10 周波数-流量特性

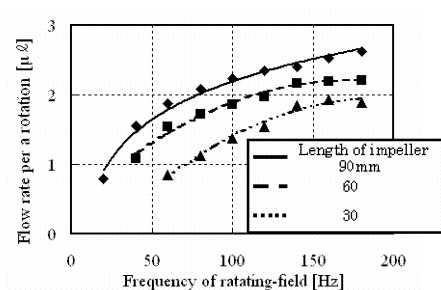


図 11 回転周波数に対するインペラの 1 回転あたりの流量

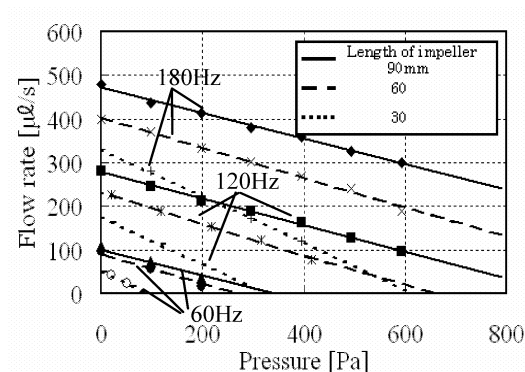


図 12 吐出圧-流量特性

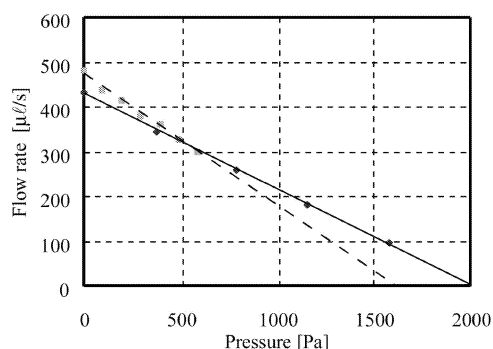


図 13 流路長が異なる吐出圧-流量特性

### 3.3 異なるインペラ長での吐出圧特性の比較

3 種類のインペラについて吐出圧-流量特性を測定した。回転周波数は 60, 120, 180 Hz の 3 種類。圧力は、吸入液面から吐出口までの高さを 0 から 60 mm まで変えることで調節した。出口の高さを 10 mm 変えるごとに流量を測定した。その結果を図 12 に示す。

それぞれの結果から、圧力がかかるとそれに比例して流量が低下することが確認できた。またその割合はインペラ長が同じ場合には同じになることがわかった。低下する割合はインペラ長 90 mm のとき  $-0.3 \mu\ell/s \cdot Pa$ , 60 mm のとき  $-0.35 \mu\ell/s \cdot Pa$ , 30 mm のとき  $-0.53 \mu\ell/s \cdot Pa$  となり、インペラが長いほど圧力が增加しても流量が低下しにくいことが確認できた。

インペラ長により圧力がかかったときの流量減少率が一定であるということから、測定できなかった 600 Pa 以上の圧力について考える。すると長さ 90 mm のインペラを回転周波数 180 Hz で回したときに最も高い吐出圧を出力できると予想される。測定結果から求めた流量の低下する割合  $-0.3 \mu\ell/s \cdot Pa$  を用い、圧力をかけていったときにどのように流量が減少していくのかを計算し図 13 に破線で示す。計算結果からは、90mm のインペラを 180Hz で回転させれば点滴装置に応用するには十分な出力がえられると予想できる。

### 3.4 点滴装置と同等の圧力での動作検証

インペラ長 90 mm, 回転周波数 180 Hz にて実際に 980 Pa の吐出圧を発生できるのかを確認した。流

路を延長して吸入液面の高さと吐出口の高さの差を大きく設定できるようにし、より大きな圧力をかけて設定した。使用した流路の長さは 378 mm であり、圧力は最大約 1600 Pa まで設定することができる。測定結果を流路長 243 mm でのインペラ長 90 mm、回転周波数 180 Hz の圧力-流量特性の計算結果と重ねて図 13 に示す。

流路長が長くなると圧力がかかったときに流量が低下しにくくなることが確認できた。流路が長くなることで液体に作用する摩擦力が増加し、流量が低下すると予想していたが、それは低圧力領域についてのみ確認され、点滴装置に用いる高圧力領域では流路が短いものよりも流路が長いものの方が大きな流量を出せるとわかった。これだけの出力があれば点滴装置に十分応用できる。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、回転磁界と永久磁石の同期を利用したワイヤレスで駆動可能なスクリー式磁気マイクロポンプを構成し、点滴装置へ応用することを目的とした。

点滴装置に応用できるマイクロポンプには、装置が身につけられるサイズであること、静脈に液送できるだけの吐出圧で出力できること、装置が傾いた際も安定した流量を保てることなどが求められる。今回は装置の小型化や出力の向上に取り組み装置全体の改善に取り組み成果をえた。

- [1] 回転磁界を発生させる方法に永久磁石を外力で回転させる方法を採用した。軸を中空にした直流モータの回転子を製作し、モータの回転軸上に流路を設けることで装置の小型化をおこなった。
- [2] 長さ 90mm のインペラを回転周波数 180Hz で回転させることで点滴装置に必要な吐出圧と流量を発生できることを確認した。

装置を水平な状態に保てるなら、現時点でも点滴装置へ応用ができるといえる。しかし本研究では身につけて自由に動き回れる点滴装置の実現を目指しているため、装置を常に水平な状態に保つことは難しい。そこで、装着者の姿勢の変化による流量の変動をなくすための流量安定機構が必要になる。その方法としては、

- [1] ジャイロセンサで装置の傾きを感知し、その傾きに適した回転数にインペラの回転を制御する方法。
- [2] 流量センサで流量を随時監視し、流量変動に合わせたインペラの回転数制御をする方法。

の 2 つが考えられ、それぞれの利点を生かした堅牢な流量安定化機構を構築していかなければならない。また静脈に液体を送り込む際は注射針をポンプに取り付けることになる。すると吸入口径と吐出口径に大きな差ができ、ポンプ特性が変化すると予想される。今後、磁気マイクロポンプの身につけられる点滴装置へ応用を目指して、流量安定機構の開発と注射針を取り付けた場合のポンプの挙動の調査に取り組んでいかなければならないといえる。

#### 参考文献

- [1] 仙道雅彦, 石山和志, 山口正洋, 荒井賢一:「スパイラル型磁気マイクロマシンの始動特性」, 日本応用磁気学会誌, Vol. 26, No. 4, 2002, pp. 653 - 656.
- [2] 谷腰欣司:「DC モータ実践のノウハウ」, 3 章, CQ 出版社(2000).
- [3] 佐藤喜一, 松村益至:「ポンプ工学」, 3 章, 4 章, 日刊工業新聞社(1969).

#### 口頭発表

- [1] 浅井良太, 山田外史, 岩原正吉:「磁気マイクロポンプの流路制御特性」, B-134, 「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム 2007 年 5 月, 早稲田大学.
- [2] 浅井良太, 山田外史, 岩原正吉:「磁気マイクロポンプの小型化に向けた構成の最適化」, A-64, 電気関連学会北陸支部連合大会 2007 年 9 月, 福井工業大学.